

Analyse de la complexité du trajet de chargement lors du fluotournage de tôles

A. ROULA^a, P.-O. BOUCHARD^a, K. MOCELLIN^a

a. CEMEF Mines ParisTech, PSL Research University, CNRS UMR 7635, CS 10207, 06904 Sophia-Antipolis Cedex, France. ahmed.roula@mines-paristech.fr

Résumé :

Le fluotournage de tôles est un procédé de mise en forme par grandes déformations au cours duquel une molette appuie localement et d'une manière évolutive sur une tôle pour la replier et l'étirer afin qu'elle épouse la forme d'un mandrin. La modélisation numérique de ce procédé incrémental est réalisée, dans cette étude, avec le logiciel FORGE®. Les modes de sollicitations rendent cette modélisation difficile avec une zone de contact molette-pièce très faible et des vitesses de rotation élevées engendrant ainsi des temps de calcul longs. Des choix concernant le maillage doivent notamment être entrepris pour réduire ce temps de calcul. L'analyse du trajet de chargement de ce procédé permet de rendre compte de la complexité des états de contraintes rencontrés dans la matière selon sa position dans la tôle. Afin de produire une simulation prédictive, cette complexité est à prendre en considération lors du choix des essais mécaniques de calibration des lois de comportement et des modèles d'endommagement.

Abstract:

Flow-forming is a forming process by large deformations during which a roller tool applies a force on a sheet metal that is local and evolving during the whole process. The FORGE® software is used in this study to model this process. Complex loading conditions, resulting from local roller-workpiece contact conditions and high rotation speed, make the modelling of this process difficult with high computation time. This requires making choices concerning the mesh size in order to reduce the computation time. The analysis of the loading path during this process shows that the stress states are complex, depending on the position into the sheet. These complex stress states must be considered to determine the characterization techniques used to calibrate the constitutive law of the material and the damage model.

Mots clefs : fluotournage, procédé incrémental, simulation par éléments finis, rupture ductile, trajet de chargement complexe.

1 Introduction

Le fluotournage de tôles est un procédé de mise en forme permettant de réaliser des pièces métalliques. Il s'agit de partir d'une ébauche plane (flan, ou tôle) et d'écraser, par le biais d'une molette, le métal (alliage d'aluminium dans cette étude) mis en rotation contre un mandrin. La matière étant sollicitée d'une manière locale et évolutive, ceci confère au procédé son caractère incrémental [1].

L'enrichissement des gammes de production des pièces en alliage d'aluminium fluotournées nécessite une étude approfondie sur le procédé en lui-même ainsi que sur les matériaux utilisés. Pour ce faire, une approche expérimentale est couplée à une démarche par modélisation numérique. Cette dernière permet de réduire les coûts associés à une approche qui se voudrait purement expérimentale, notamment en termes de coûts matière. De plus, une telle approche permet d'avoir accès à des données relatives au matériau et au procédé qui sont parfois difficiles voire impossibles d'accès expérimentalement.

Les paramètres d'une simulation numérique sont à la fois relatifs au procédé de fluotournage et au matériau utilisé. Ce dernier est modélisé par une loi de comportement traduisant sa réponse à une sollicitation donnée. De plus, un modèle d'endommagement lui est attribué afin de permettre de prédire sa rupture. L'identification des paramètres de la loi de comportement et du modèle d'endommagement nécessite de réaliser des essais aussi proches que possible de l'état de contraintes subi par la matière lors du procédé de fluotournage.

Après une description du procédé de fluotournage et des paramètres de sa modélisation, nous analyserons certains aspects du trajet de chargement de ce procédé.

2 Description du fluotournage

2.1 Dispositif et outillage

Le fluotournage est un procédé de mise en forme par grandes déformations plastiques au cours duquel des matériaux, généralement métalliques, sont mis en forme à froid ou à chaud. Certains auteurs [2] classifient le fluotournage en trois catégories, notamment selon les modes de déformations et les épaisseurs finales atteintes (Figure 1) :

- le fluotournage conventionnel (ou repoussage) au cours duquel l'ébauche initiale et la paroi de la forme finale ont la même épaisseur,
- le fluotournage conique (ou shear spinning), au cours duquel l'épaisseur finale de la paroi est inférieure à l'épaisseur initiale du flan. Cette réduction d'épaisseur est dictée par une loi sinus (sin-law en anglais),
- le fluotournage cylindrique (ou fluotournage de tube), au cours duquel une ou plusieurs molettes viennent appuyer sur la paroi de l'ébauche, qui est elle-même en forme de tube, pour réduire son épaisseur.

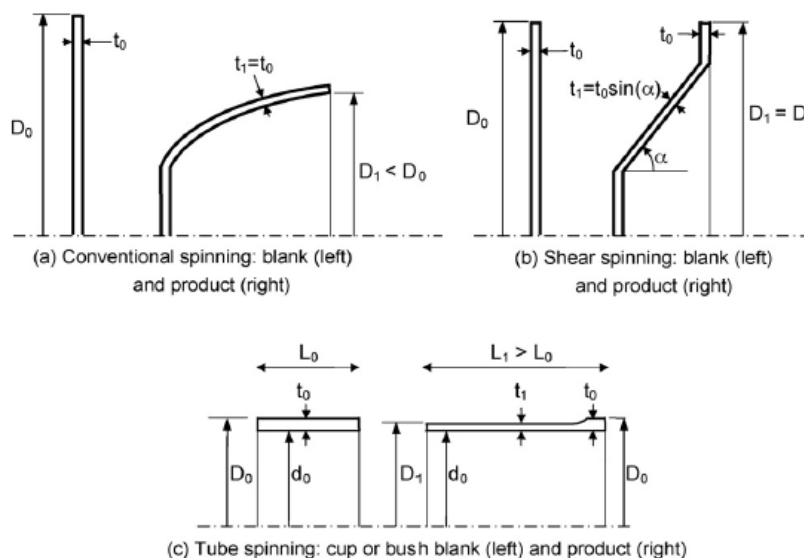


Figure 1 Configurations du fluotournage selon [2] (a) repoussage ; (b) fluotournage conique ; (c) fluotournage cylindrique (de tube)

Le procédé de fluotournage étudié dans ce travail de thèse est différent de ceux décrits par ces auteurs. En effet, durant celui-ci, la tôle est maintenue entre une contre-pointe et un mandrin. L'ensemble tourne à grande vitesse autour d'un axe vertical pendant que la molette, qui décrit une trajectoire relative hélicoïdale, vient appuyer localement sur la tôle afin de la replier et l'étirer (Figure 2). Le métal épouse alors, de l'intérieur, la forme extérieure du mandrin, et de l'extérieur, la trajectoire de la molette. Une lubrification est imposée entre la tôle et ces deux outils.

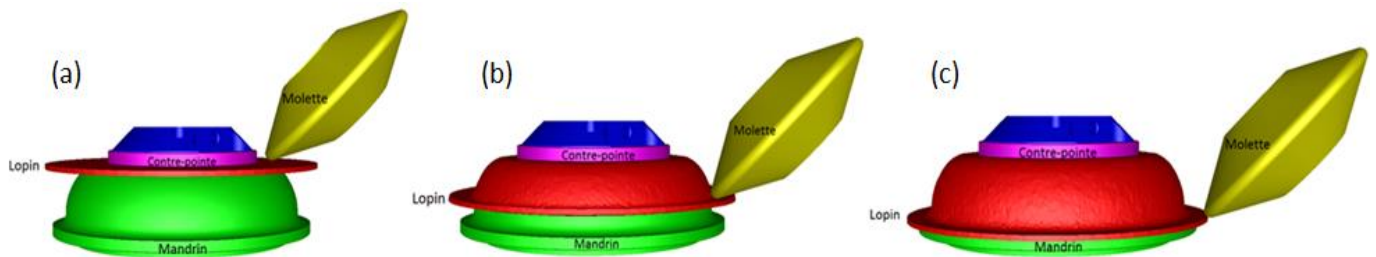


Figure 2 Simulation du fluotournage d'une tôle d'alliage AA4006 par le logiciel FORGE® : (a) état initial; (b) état intermédiaire; (c) état final. La molette adopte une trajectoire relative hélicoïdale

2.2 Paramètres du matériau et du procédé

Pour un matériau donné, plusieurs paramètres du procédé peuvent être ajustés pour modifier la géométrie finale des pièces fluotournées. Ceux-ci sont :

- la trajectoire suivie par la molette,
- le mandrin (ou galbe) utilisé,
- la lubrification imposée aux zones de frottement,
- la forme de la molette et son inclinaison par rapport à l'axe du mandrin,
- la vitesse de rotation du mandrin.

Théoriquement, les deux premiers paramètres ci-dessus déterminent la géométrie de la partie de la pièce repliée et étirée par la molette.

A ces paramètres, on peut ajouter ceux liés à la tôle utilisée (sa nuance et ses dimensions initiales). En effet, il a été remarqué qu'en changeant la nuance d'aluminium tout en gardant la même trajectoire de molette et le même mandrin, la partie de la pièce repliée et étirée par la molette ne possède pas la même géométrie. Il en est de même pour les dimensions initiales de la tôle.

3 Simulation numérique du fluotournage

Avant d'analyser le trajet de chargement caractéristique du fluotournage de tôles, il est nécessaire d'établir une modélisation numérique robuste du procédé. Le but de cette section est alors de décrire la méthodologie permettant de modéliser ce procédé.

La modélisation numérique du procédé de fluotournage se fait par le logiciel FORGE®. Ce logiciel éléments finis offre la possibilité de simuler une large gamme de procédés de mise en forme, des plus traditionnels comme le forgeage ou la frappe, aux plus spécifiques comme le laminage ou le fluotournage. Ce logiciel utilise des éléments linéaires tétraédriques et est basé sur une formulation mixte vitesse-pression (P1+/P1) avec une résolution implicite.

Le procédé de fluotournage est un procédé incrémental. En effet, le contact entre la molette et la matière est local et évolutif durant tout le procédé. De plus, les cycles de production très rapides imposent des vitesses de déformation de la matière très grandes. Ces deux contraintes (localisation du chargement – rapidité du procédé) imposent, lors de la modélisation, des discrétisations temporelle et spatiale des plus précises. Un pas de temps très petit est nécessaire au vu de la vitesse de rotation de la

molette ainsi que du caractère local de la déformation. Le maillage conditionne également le temps de calcul d'une simulation. Il faut qu'il soit assez fin, notamment dans l'épaisseur de la tôle, pour arriver à lui faire épouser la forme du mandrin et de la molette, mais pas trop fin pour ne pas pénaliser grandement le temps de calcul : un compromis est alors à trouver.

Un exemple de maillage est illustré sur la Figure 3. Sur celle-ci, plusieurs tailles de maille ont été choisies, en fonction de la précision voulue des résultats dans les zones correspondantes.

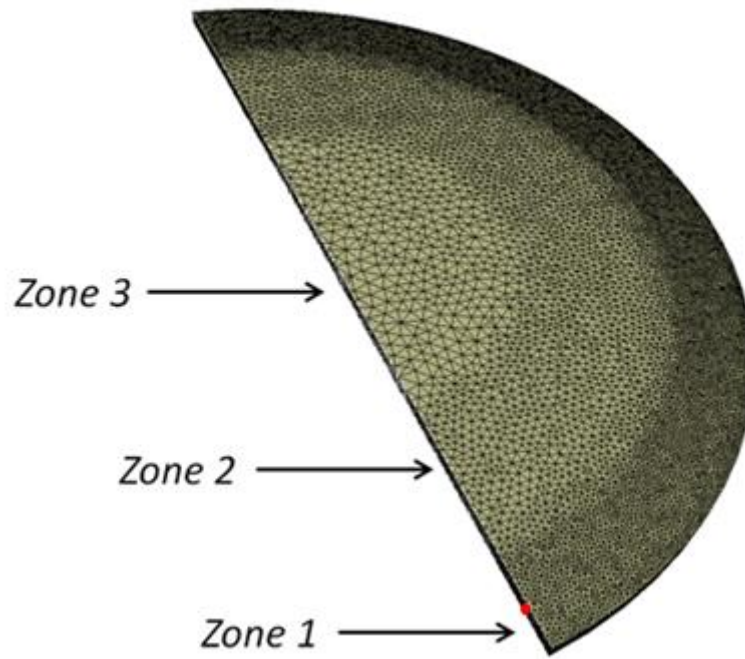


Figure 3 Exemple de maillage réalisé sur une tôle en forme de disque (ici tronqué pour l'illustration) de diamètre 280 mm et d'épaisseur 4,5 mm – Les zones 1, 2 et 3 ont une taille de maille de 1 mm, 2 mm et 3 mm, respectivement. Le point rouge correspond au capteur numérique situé à un rayon de 127 mm à mi-épaisseur.

On remarque sur cette figure que le maillage est plus fin dans la zone 1 car une précision dimensionnelle y est souhaitée. A contrario, la zone 3 est située au contact de la contre-pointe et du mandrin et n'est donc pas déformée : une taille de maille « grossière » y est donc choisie. La zone 2 est quant à elle maillée de sorte à avoir 2 à 3 éléments dans l'épaisseur. En effet, un minimum de 2 à 3 éléments dans l'épaisseur est nécessaire pour tenir compte du mode de déformation en flexion au niveau des rayons de congés. Un maillage plus fin améliorerait légèrement la précision des résultats mais conduirait à des temps de calcul trop longs. Pour étayer ceci, une étude sur la sensibilité au maillage a été réalisée. Celle-ci montre que le passage de 2 mm à 1 mm en taille de maille dans la zone 1 (zone se déformant en flexion aussi) conduit à une augmentation du temps de calcul de 298 h (passage de 246 h à 544 h) sans pour autant améliorer grandement les résultats géométriques et mécaniques.

La simulation du procédé de fluotournage est réalisée en considérant la tôle, le mandrin et la contre-pointe fixes pendant que la molette décrit une trajectoire hélicoïdale, alors qu'industriellement, le mandrin tourne avec la tôle et la contre-pointe. En effet, ce choix offre un gain à la fois en termes de temps de calcul et de meilleure conservation du volume de la tôle par rapport à la configuration d'un mandrin tournant et entraînant la tôle.

Dans un repère cartésien, la trajectoire hélicoïdale de la molette en simulation est construite en déterminant, à partir des points théoriques qu'emprunte la molette dans le tour de fluotournage industriel, les vitesses successives aux temps du procédé.

Le matériau mis en forme est un alliage d'aluminium 4006 dont le comportement est élasto-plastique à écrouissage isotrope. La loi de comportement est une loi puissance dont l'équation est $\sigma = k \cdot \varepsilon^n$ où σ est la contrainte d'écoulement, ε la déformation équivalente, k la consistance et n le coefficient d'écrouissage. Le module d'Young E vaut 69 GPa, la consistance k vaut 165 MPa et le coefficient d'écrouissage n vaut 0,22.

4 Analyse du trajet de chargement en fluotournage

L'analyse du trajet de chargement en fluotournage est d'une grande importance. En effet, connaître les types de sollicitations que subit la matière sert notamment à savoir quels essais mécaniques peuvent être utilisés pour calibrer les lois de comportement des matériaux mis en forme par ce procédé ainsi que les modèles d'endommagement [3] [4].

La Figure 4 montre l'évolution de la déformation équivalente en fonction du temps sur le capteur numérique placé à mi-épaisseur dans le disque, au rayon 127 mm (cf. Figure 3). La pièce est un disque en alliage d'aluminium 4006 dont les dimensions correspondent à celles explicitées sur la Figure 3.

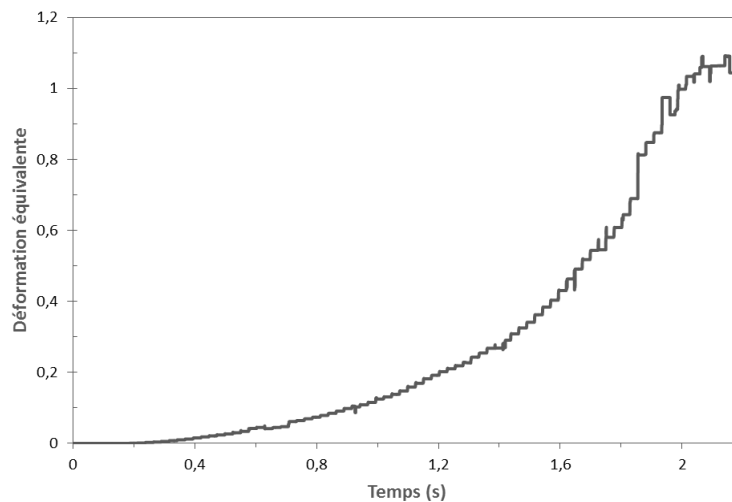


Figure 4 Déformation équivalente en fonction du temps relevée au niveau du capteur numérique situé à mi-épaisseur dans le disque

On voit bien sur cette figure l'évolution progressive de la déformation équivalente locale au fur et à mesure de l'avancée du procédé. Cette déformation provient du passage de la molette ainsi que du pliage général de la tôle et de son élongation (voir Figure 2). Après le passage de la molette au niveau du capteur, la déformation atteint une valeur finale supérieure à 1. Ceci montre que localement, on atteint des valeurs de déformation très élevées, bien supérieures à celles que l'on pourrait atteindre lors d'un essai de caractérisation en traction. Chaque zone de la tôle est ainsi grandement déformée et la contribution de chacune des zones résulte en une grande déformation totale de la pièce. Ceci confère donc au fluotournage sa caractéristique de procédé de mise en forme par grandes déformations. La conséquence de cela est que pour calibrer une loi de comportement et un critère d'endommagement d'un matériau mis en forme par ce procédé, il pourrait être nécessaire d'utiliser des essais de calibration qui présentent les mêmes niveaux de déformation et des états de contraintes similaires.

La Figure 5 montre l'évolution de la vitesse de déformation en fonction du temps au niveau du même capteur.

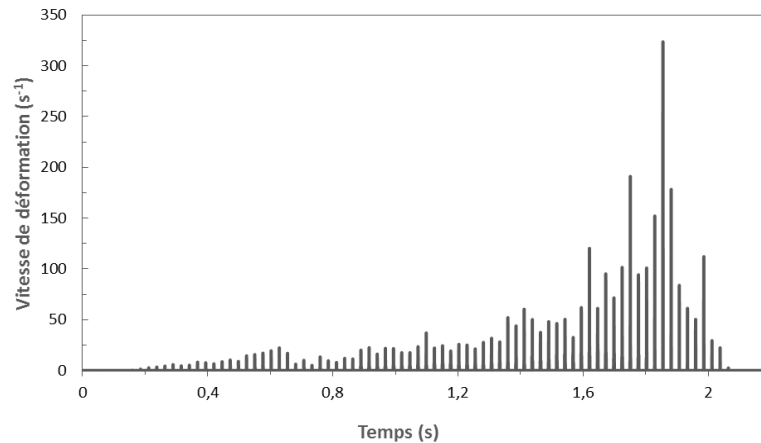


Figure 5 Evolution de la vitesse de déformation en fonction du temps au niveau du capteur numérique situé à mi-épaisseur dans le disque

La vitesse de déformation évolue de manière cyclique, c'est-à-dire que chaque passage de molette au voisinage du capteur sollicite la matière à son niveau. Au fur et à mesure que la molette se rapproche du capteur, la matière proche est de plus en plus sollicitée, et cela jusqu'au pic maximal (323 s^{-1}) qui survient à 1,85 s, ce qui correspond sur la Figure 4 à une hausse notable de la déformation équivalente. La matière étant sollicitée de manière cyclique, il pourrait alors être nécessaire d'utiliser des essais de caractérisation cycliques pour calibrer au mieux la loi de comportement et le critère d'endommagement. Ces essais cycliques permettraient de tenir compte de l'érouissage cinématique subi par la matière [5].

Le fluotournage et les procédés incrémentaux en général se distinguent d'autres procédés de mise en forme conventionnels par la complexité des états de contrainte rencontrés par la matière, selon son emplacement par rapport à la position de la molette et selon sa position dans l'épaisseur [6]. La Figure 6 illustre ceci en montrant l'évolution du taux de triaxialité des contraintes¹ (ou simplement triaxialité) en fonction de la déformation équivalente.

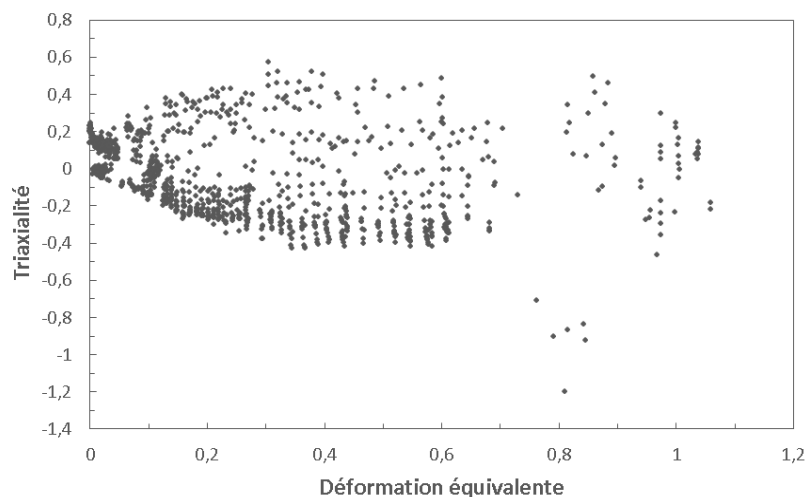


Figure 6 Evolution de la triaxialité en fonction de la déformation équivalente au niveau du capteur numérique situé à mi-épaisseur dans le disque. Les valeurs de triaxialité sont filtrées pour des valeurs de vitesses de déformation supérieures à 10^{-3} s^{-1}

¹ Défini par le rapport entre l'opposé de la pression hydrostatique et la contrainte équivalente

On remarque ainsi qu'au niveau d'un même volume de matière, celui-ci est tantôt sollicité en traction (triaxialité positive) tantôt en compression (triaxialité négative). De surcroît, il a été observé que pour une même position radiale dans le disque, l'état de contrainte varie en fonction de l'épaisseur. Le mode de sollicitation est donc fortement non-monotone. Ceci montre encore une fois que les essais de calibration doivent être bien choisis, tenant donc compte du caractère non-monotone du chargement.

La Figure 7 montre l'évolution de la vitesse de déformation et de la triaxialité des contraintes en fonction du temps sur le même capteur (cf. Figure 3), et cela au cours du cycle de passage de molette qui génère la plus grande vitesse de déformation.

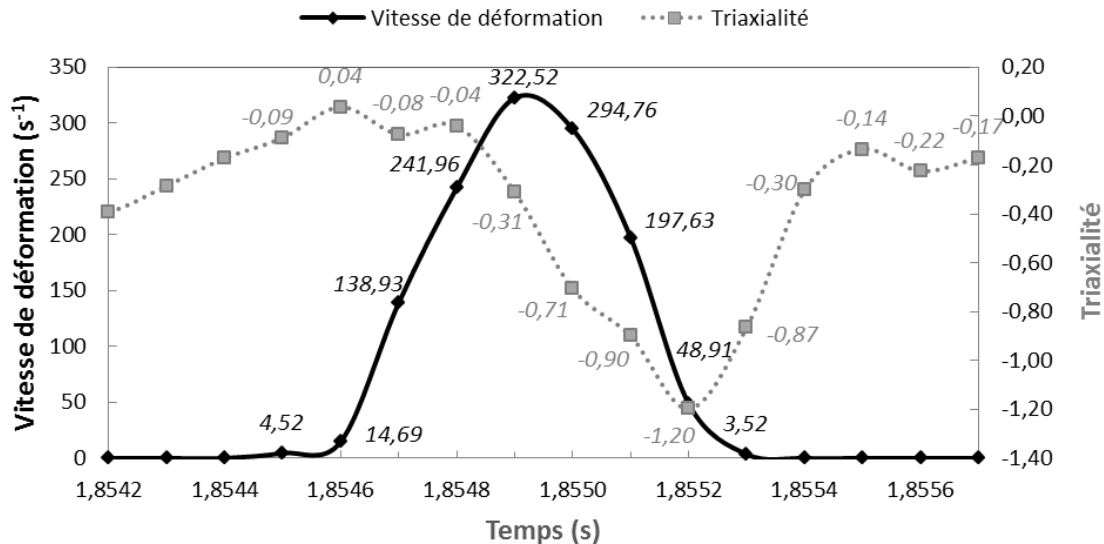


Figure 7 Evolution de la vitesse de déformation et de la triaxialité en fonction du temps au niveau du capteur numérique situé à mi-épaisseur. Observation restreinte à un unique cycle de passage de molette

On remarque sur cette figure que lorsque la molette passe au niveau du capteur, donc pour des vitesses de déformation grandes, l'état de contrainte est caractérisé par des valeurs de triaxialité basses, il est donc très compressif. Or l'accumulation de l'endommagement n'est significative que si la triaxialité est grande lorsque la vitesse de déformation est grande aussi. Des auteurs montrent que pour des valeurs de triaxialité inférieures à $-1/3$, le matériau ne s'endommage pas [7].

Le caractère non-endommageant de la compression, en plus de l'aspect incrémental de la sollicitation explique donc le fait que le fluotournage confère au matériau une formabilité très intéressante.

Conclusion

Le fluotournage de tôles est un procédé de mise en forme incrémental caractérisé par sa rapidité (vitesse de rotation élevée) et la zone de déformation très localisée imposée par la molette. Ces deux spécificités rendent sa modélisation numérique complexe, nécessitant des discrétisations temporelle et spatiale fines. Malgré les choix entrepris pour réduire le temps de calcul, celui-ci demeure encore conséquent (de l'ordre de plusieurs jours pour un calcul lancé sur 6 processeurs d'un ordinateur de bureau) et des études seront menées pour tenter de le réduire encore plus.

Du fait des modes de sollicitations de la matière, celle-ci subit des états de contraintes complexes, cycliques et non-monotones. En effet, selon sa position, la matière est sollicitée différemment dans le disque et au niveau d'un élément de matière donné, l'état de contrainte évolue significativement au cours du procédé.

Cette analyse de l'état de contrainte permet de mettre en évidence la nécessité d'adopter des essais de caractérisation dont les sollicitations se rapprochent de celles vues par la matière en fluotournage. De surcroît, cette analyse de l'état de contrainte permet d'expliquer la formabilité intéressante des matériaux mis en forme par ce procédé.

Dans le cadre de ce travail de thèse, un tour de fluotournage industriel sera instrumenté par des moyens de mesure d'effort et de déplacement. Ces données permettront notamment d'enrichir la loi de comportement du matériau mis en forme.

Références

- [1] Tisza, M. (2012). General overview of sheet incremental forming. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 55, 113-119.
- [2] Music, O., Allwood, J. M., & Kawai, K. (2010). A review of the mechanics of metal spinning. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(1), 3-23.
- [3] Cao, T. S., & Bouchard, P.-O. (2016). Modélisation de l'endommagement ductile en mise en forme des métaux. In : *Techniques de l'ingénieur : Matériaux - Mise en forme des métaux et fonderie*, M 3033. Paris : Techniques de l'ingénieur, 1-26.
- [4] Guzmán, C. F., Yuan, S., Duchêne, L., Saavedra Flores, E. I., & Habraken, A. M. (2018). Damage prediction in single point incremental forming using an extended Gurson model. *International Journal of Solids and Structures*, 151, 45-56.
- [5] Jin, K., Guo, X., Tao, J., Wang, H., Kim, N., & Gu, Y. (2016). A model of one-surface cyclic plasticity with Lemaitre damage criterion for plastic instability prediction in the incremental forming process. *International Journal of Mechanical Sciences*, 114, 88-97.
- [6] Emmens, W. C., & van den Boogaard, A. H. (2009). An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(8), 3688-3695.
- [7] Bao, Y., & Wierzbicki, T. (2005). On the cut-off value of negative triaxiality for fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, 72(7), 1049-1069.